

마이크로 CT 이미지를 활용한 3D 프린팅 콘크리트의 공극 분포에 따른 인장파괴의 거동 예측

유찬호* · 김지수**

Yoo, Chan Ho*, Kim, Ji-Su**

Prediction of Mechanical Response of 3D Printed Concrete according to Pore Distribution using Micro CT Images

ABSTRACT

In this study, micro CT images were used to confirm the tensile fracture strength according to the pore distribution characteristics of 3D printed concrete. Unlike general specimens, concrete structures printed by 3D printing techniques have the direction of pores (voids) depending on the stacking direction and the presence of filaments contact surfaces. Accordingly, the pore distribution of 3D printed concrete specimens was analyzed through quantitative and qualitative methods, and the tensile strength by direction was analyzed through a finite element technique. It was confirmed that the pores inside the 3D printed specimen had directionality, resulting in their anisotropic behavior. This study aims to analyze the characteristics of 3D concrete printing specimen and correlate them with simulation-based mechanical properties to improve performance of 3D printed material and structure.

Keywords : Pore, 3D printed concrete, Micro CT, Tensile fracture, Pore distribution characteristic

초록

본 연구에서는 마이크로 CT 이미지를 활용하여 3D 프린팅 콘크리트의 공극분포 특성에 따른 인장파괴 강도를 확인하였다. 3D 프린팅 기법으로 출력된 콘크리트 구조물은 일반적인 시편과는 다르게 적층방향 및 필라멘트 접촉면의 존재에 따라 공극의 방향성을 갖는다. 이에 따라 3D 프린팅 콘크리트 시편의 공극분포를 확률론적 방법으로 분석하고, 유한요소기법을 통해 방향별 인장강도를 분석하였다. 3D 프린팅된 시편 내부의 공극이 방향성을 갖는 것을 확인하였고, 출력에 의한 미세구조 특성-강도의 영향성을 평가하였다. 본 연구는 마이크로 CT 이미지 기반의 공극 분포 특성을 분석하고 시뮬레이션을 활용한 기계적 물성 평가를 수행하여 보다 향상된 성능의 적층 구조물 설계 및 재료 개발에 활용하고자 한다.

검색어 : 공극, 3D프린팅 콘크리트, 마이크로 CT, 인장파괴, 공극분포특성

1. 서론

최근에 4차 산업혁명시대가 도래하면서 모든 분야에 자동화 및 AI 기술이 도입되고 있다. 이러한 흐름에 맞게 건설 산업에서도

3D 프린팅 기법을 활용한 건설 자동화 기술을 적용하고 있다. 또한 3D 프린팅 시공 메커니즘은 기존의 시공방식과 다르게 거푸집을 이용하지 않는 비정형 건설 방식이다. 따라서 3D 프린팅 콘크리트는 거푸집 제작비용과 시간이 들지 않아서 매우 경제적인 시공

* 서울시립대학교 토목공학과 학사과정 (University of Seoul · dbcksg917@uos.ac.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 조교수, 공학박사 (Corresponding Author · University of Seoul · jis.kim@uos.ac.kr)

Received December 1, 2023/ revised January 3, 2024/ accepted January 3, 2024

방식으로 볼 수 있다(De soto et al., 2018). 현재 3D 프린팅 콘크리트로 시공 중 출력되는 필라멘트의 적층성 및 안정성에 관한 연구와 3D 프린팅 콘크리트의 필라멘트 출력 시간 지연에 따른 적층 성능에 관한 연구와 같은 3D 프린팅 콘크리트에서 출력되는 구조물들의 내구성에 관한 연구들이 진행되어왔다(Kim et al., 2021; Hong et al., 2018; Lee et al., 2019b).

3D 프린팅 콘크리트는 출력 및 적층이 진행되는 방향에 따라 내부 공극의 분포가 변한다. 기존 몰드 타설 콘크리트의 경우 내부의 상 분포 특성이 특정한 방향성을 갖지 않는 등방성을 나타내는 반면, 3D 프린팅된 재료는 적층 면과 접촉 면 사이에 불연속한 지점이 존재하게 되어 재료 스케일에서 비등방성인 특성을 갖게 된다. 비등방성을 갖는 공극의 분포는 결과적으로 재료와 구조물의 응답의 이방성에 영향을 주게 된다(Kruger and van der Westhuizen, 2023). 이에 따라, 3D 프린팅된 구조물의 성능을 보다 정확히 파악하기 위해서는 출력된 재료 내부의 미세구조 분석에 대한 심도있는 연구가 선행되어야 한다.

시편 내부의 공극의 특성은 대표적인 비파괴 기법인 마이크로 CT(Computed tomography) 이미지 분석 기법을 활용하여 확인할 수 있다. 시멘트계 재료를 포함한 수많은 재료들의 미세구조 특성을 3차원으로 효과적인 분석하는 연구들이 다양하게 수행되어 왔다(Kim et al., 2019). 이에 따라, 본 연구에서는 3D 프린팅 콘크리트로 출력한 적층 구조물의 서로 다른 적층 레이어 사이의 부착면 뿐 만 아니라 동일한 높이의 필라멘트끼리 부착하는 면에서의 공극 분포 특성을 분석하였다. 3D 프린터를 이용한 비정형 구조물 및 3D 프린팅 콘크리트 시편에서 출력 재료의 부착면(특히 필라멘트 사이)에 존재하는 공극의 특성 및 강도를 방향에 따라 분석하는 것을 목표로 한다.

기존 연구들에서 CT 이미지 분석 기반의 3D 프린팅 시편의 공극 분포 특성을 확인하였으나, 이미지 기반 3D 프린팅 가상 시편을 제작하여 가상실험을 수행한 연구들은 많이 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 이용해서 필라멘트 사이에 존재하는 공극의 연속성과 공극 분포가 강도 및 내구성에 미치는 영향에 대한 가상 실험을 수행하였다. CT 이미지 기반의 3차원 가상 시편을 제작하고 시뮬레이션 기법을 통해 각 방향으로 인장시험을 진행하여 공극 분포의 방향성 및 강도의 상관관계에 대해 분석을 진행하였다.

2. 연구 방법

2.1 3D 콘크리트 프린팅 시편 제작

본 연구에서는 X-Y-Z 방향으로 움직일 수 있는 젠트리(gentry) 타입의 3D 콘크리트 프린터를 활용하여 출력 시편을 제작하였다.

3D 프린터는 노즐 8 mm를 가지며, 프린터의 압력 및 자중 등에 의하여 출력된 재료가 높이 3 mm, 폭 10 mm를 만족하도록 하는 프린팅 조건을 결정하였다. 프린팅에 사용된 재료는 기존 연구에서 도출한 출력성 및 적층성이 검증된 재료 배합을 사용하였다(Cuevas et al., 2023).

기존 연구를 바탕으로 설정한 3D 프린터 조건 및 재료 배합을 사용하여 4×4×16 cm³ 크기를 갖는 휨 실험용 시편을 출력하였다. 노즐에서 출력된 재료를 필라멘트라 하였을 때, 출력된 필라멘트의 폭은 10 mm이므로 총 4개의 필라멘트가 높이 방향으로 적층되는 형태를 갖게 된다. 총 13층 출력을 진행하여 목적하는 프린팅 시편을 제작하였고, 적층 과정에서 발생하는 필라멘트 사이의 빈 공간(공극)이 재료 물성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2.2 가상 시편 제작

본 연구에서는 3D 프린터로 출력된 콘크리트가 가지는 공극의 분포 특성에 따른 기계적 물성의 영향을 평가하기 위해, 먼저 마이크로 CT 이미지 분석 기법을 활용하여 공극의 분포에 대한 정량적 특성을 분석하고자 하였다. 마이크로 CT는 Nanotum 장비(Waygate Baker, Germany)를 사용하였으며, 이미지를 구성하는 하나의 픽셀 크기는 33 μm으로 설정하였다. 출력된 휨 시편을 CT 촬영하여 2차원 단면 이미지를 얻었으며, 이를 3차원으로 적층하여 전체 시편에 대한 3차원 가상 시편을 제작하였다(Fig. 1 회색 시편).

본 연구에서는 연속한 필라멘트 사이의 공극 분포 양상을 분석하기 위해, 두 필라멘트 경계선 주변의 영역을 관심영역(ROI, Region of interest)으로 지정하였다. 크기가 9.9×9.9×9.9 mm³ (300×300×300 복셀)을 갖는 가상 시편을 다양한 위치에서 30개 추출하였다. 각 시편들은 해석의 용이성을 위해 동일한

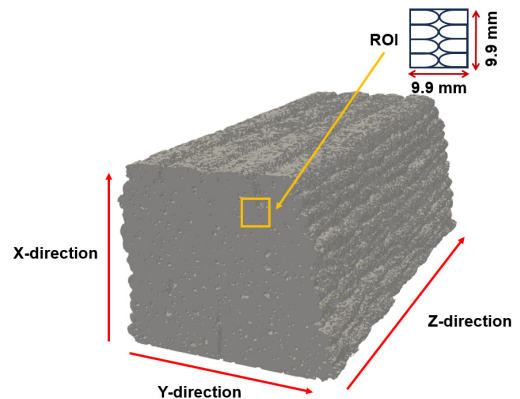


Fig. 1. 3D Printed Concrete Specimen Obtained from Micro CT Images

ROI 크기를 유지하면서 구성하는 복셀 수를 1/3로 크기를 조정 (resize)하였다. 공극과 고체 상을 히스토그램 기법을 적용하여 상 분리 작업을 수행하고, 고체 상에 대한 가상실험용 가상 시편을 제작하였다. 3D 프린팅 콘크리트의 방향성은 Fig. 1과 같이 필라멘트끼리의 경계선을 당기는 방향을 Y축, 레이어가 위로 적층되는 방향을 X축, 레이어의 출력이 진행되는 방향을 Z축으로 두고 공극의 분포 특성 및 기계적 물성에 대한 분석을 진행하였다.

2.3 시뮬레이션 기법

마이크로 CT 이미지로부터 제작한 가상 시편을 사용하여 가상실험(시뮬레이션)을 진행하였다. 필라멘트 사이 영역으로 제작된 가상 시편의 부착과 관련된 인장 성능을 평가하기 위하여 상장균열모델을 적용하였다(Miehe et al., 2015). 상장균열모델은 균열을 하나의 상으로 하여 가해지는 하중에 따른 균열의 진전을 모사할 수 있다는 점에서 장점을 가진다.

상장균열모델은 균열을 하나의 상(d)으로 고려하며, 균열이 진행되지 않은 경우 d 의 값은 0의 값을, 균열이 완전히 진행된 상태를 1의 값을 갖는다. 이 모델에서는 균열이 날카로운 형태가 아닌 확산된 형태로 가정하여, 균열이 확산된 정도를 l 로 나타낸다. 응력 분포와 균열 상을 구하기 위해서는 재료의 탄성계수, 강도, 포아송 비, 균열확산계수가 결정되어야 한다. 해당 값들은 기존의 참고문헌을 참고하여 결정하였다(Kim et al., 2019).

제작된 가상 시편에서 공극에 해당하는 요소를 제외하고 남은 고체 상 요소에 시멘트 기반의 물성정보(인장과피강도, 탄성계수 등)를 부여하여 유한요소해석을 방향에 따라 수행하였다. 본 연구에서는 3D 프린팅된 콘크리트 시편의 공극이 분포하는 특성에 따른 기계적 물성(인장성능)을 비교하기 위한 연구이기 때문에, 모든 시편들의 상대적인 응답에 대한 비교하기 위해 모든 시편에 동일한 재료 물성 정보를 사용하였다. 인장 가상실험을 수행하기 위해서 시편의 바닥면과 상부면을 완전 고정하는 경계조건을 사용하고 상부면에 인장 변형을 가하는 조건으로 인장 실험 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 연구 결과

3.1 가상 시편

3D 프린팅된 콘크리트의 출력 재료(필라멘트) 사이의 영역을 선택하여 제작한 $9.9 \times 9.9 \times 9.9 \text{ mm}^3$ 규격의 임의의 가상 시편을 제작하여 시편 내부에 존재하는 공극들을 나타낸 3차원 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 일반적인 몰드 타설 시편의 경우 시편 내부에 작은 공극들이 등방성을 가지며 존재한다. 하지만 프린팅된 재료 내부의 공극은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 특정한 방향성을 갖는 것을 확인하였다. 특히 같은 층의 필라멘트 경계면 사이(Fig. 1, 노란색 영역)에서 공극이 크고 뚜렷하게 존재하는 것을 볼 수 있다.

두 개 이상의 필라멘트가 연속하여 존재하는 경우에는 노즐의 형태(원형, 사각형 등)와 출력 속도(적층 시간) 등에 따라 필라멘트 사이의 부착 성능이 달라진다. 예를 들어, 둥근 형태의 노즐이 사용된 경우, 필라멘트 사이의 공간이 완전히 채워지지 않고 재료가 비어있는 공간이 발생할 수 있고(Fig. 2, 왼쪽), 동일한 노즐 형태임에도 불구하고 프린터 압력 및 적층 레이어 수 등의 영향으로 두 필라멘트 사이가 큰 공극 없이 잘 부착되어 있을 수 있음을 확인하였다(Fig. 2, 오른쪽)(Xiao et al., 2021). 이러한 방향성을 갖는 공극 분포로 인해 적층 구조물은 방향에 따라 응답이 달라지는 이방성을 가질 수 있기 때문에, 본 연구에서는 시뮬레이션 기반으로 Fig. 1에서 정의한 각 축 방향으로 인장강도 시험을 진행하여 재료 응답의 방향성을 확인하였다.

3.2 공극 분포 특성 분석

공극의 분포 특성은 공극비와 공극의 최대 크기 간의 상관관계로 정성적인 분석을 진행하였다. CT 이미지로부터 얻은 공극 및 고체 상 정보로부터 공극비와 공극의 유효 최대 크기를 계산하였다. 공극비는 가상 시편 내부에 존재하는 공극의 절대적인 양의 전체 부피에 대한 비율로 계산하였다. 공극의 유효 최대 크기는 각 시편별 내부에 존재하는 공극들을 동일하게 측정해서 가장 큰 공극을

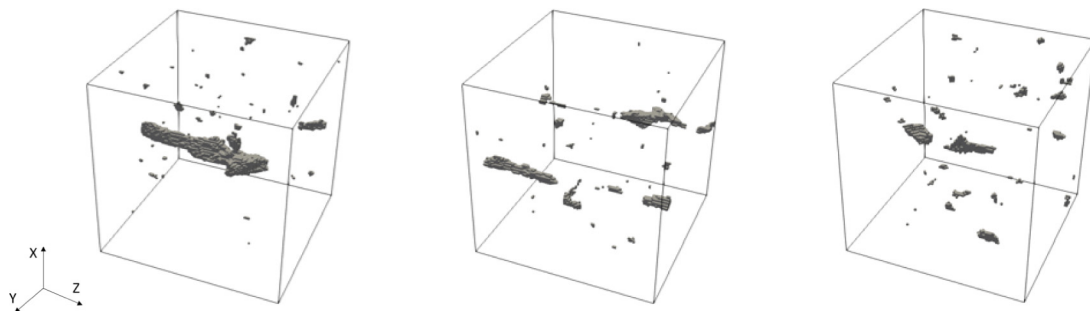


Fig. 2. Virtual Mesh for Pore Phases

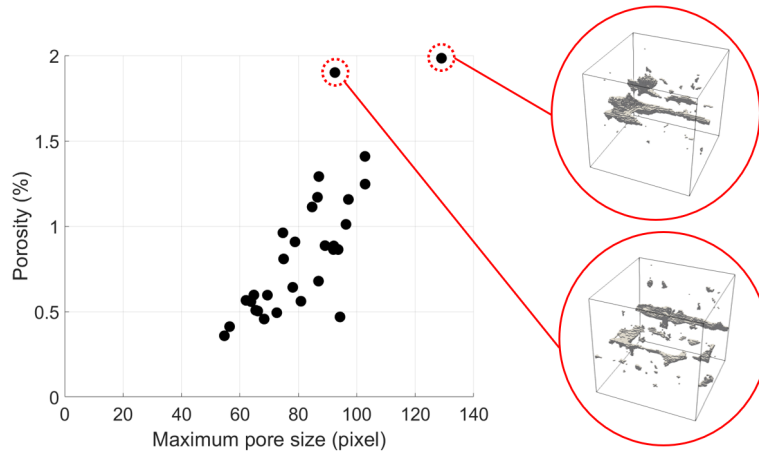


Fig. 3. Relationship between Maximum Pore Size and Porosity

찾고, 그 공극의 유효 반지름을 계산하여 voxel 크기 기반으로 표현한 값으로 나타내었다.

공극비와 공극의 최대 크기에 대한 상관관계를 Fig. 3에 나타내었다. 큰 공극이 존재할수록 공극비가 증가하는 것을 확인하였다. 그림에서 공극비가 비교적 큰 두 개의 시편 내부의 공극 분포 특성을 분석한 결과(Fig. 3, 빨간색 마커), 두 경우 모두 필라멘트 사이의 공극이 출력 방향으로 연속적으로 존재하였다. 그 중, ROI 영역 내에서 필라멘트 사이가 연속적인(이어진) 공극을 갖는 경우에는 공극의 최대 크기 역시 가장 크게 평가되었으나(Fig. 3, 오른쪽 위), 연속성이 상대적으로 적은 경우(Fig. 3, 오른쪽 아래)에는 공극의 절대적인 양은 많지만 유효 최대 크기는 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 임의의 가상 시편이 같은 양의 공극비를 가진다고 해도 공극이 어떻게 분포해있는지에 따라 공극의 최대 크기가 달라질 수 있음을 나타낸다.

공극비가 높은 두 시편은 적층 시편의 상단부에 위치해 있으며, 프린팅 과정 중 추가적으로 적층되는 레이어의 수가 적어 이후 출력된 레이어들의 중력에 의한 영향이 적게 작용한다. 이를 통해, 3D 프린팅 시편이 적층되면서 상부에서 작용하는 추가 레이어(층)에 의한 중력의 영향에 따라 다수의 필라멘트를 갖는 시편의 응답 및 부착 성능이 영향을 받을 수 있음을 확인하였다. 추후 가상 시편들의 위치 정보와 그에 따른 공극의 분포도 및 강도와의 상관관계를 비교하여 영향성을 조사하고자 한다.

3.3 3D 프린팅 콘크리트의 공극 분포 특성과 강도의 상관 관계

공극비와 공극의 최대 크기로 확인한 3D 프린팅 콘크리트 재료의 공극 분포 특성은 강도와 높은 상관관계를 가진다(Murcia et al., 2020; Ma et al., 2019). 특히 적층이 되는 3D 프린팅 구조물의

특성 상 적층 방향에 따라 재료의 응답이 달라진다. Murcia et al.(2020)에서는 적층 패턴에 따라서도 공극 특성과 적층 재료의 응답이 달라지는 것을 확인하였고, 이를 통해 최적의 적층 패턴을 결정하였다. 본 연구에서는, 마이크로 CT 이미지로부터 확인한 공극 특성과 인장 강도와의 상관관계를 분석하기 위해 가상실험으로 얻은 해석 결과를 활용하였다.

시뮬레이션 결과로 얻은 30개 가상 시편의 인장 강도를 방향에 따라 확인하였다. Fig. 4는 공극비에 따른 인장강도를 방향 별로 모든 시편에 대해 나타내었고, 방향 별 평균 응답 값(강도)을 파란색 실선으로 표시하였다. Fig. 1에서 정의한 방향에 따라 적층 방향(높이 방향)으로 하중을 가하여 레이어 사이의 부착 성능을 X축 해석 결과로 확인할 수 있다(Fig. 4(a)). 필라멘트 사이 영역은 XZ 평면으로 표현할 수 있으며, 그에 따라 Y축 인장하중을 가한 결과로부터 필라멘트 사이의 부착 성능을 설명할 수 있다(Fig. 4(b)).

공극비와 부착 성능과의 상관관계를 확인하기 위해, 공극비와 해석 결과로 얻은 인장강도를 Fig. 4에 나타내었다. 전반적으로 공극비가 증가할수록 강도는 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 일부 시편의 경우, 공극비가 증가할 때 오히려 강도가 증가하는 경우도 존재한다(Fig. 4(a), 빨간색 마커). 이를 통해 공극비가 증가할수록 항상 강도가 감소하는 것은 아니며(Lee et al., 2019a), 공극비 이외에도 강도에 영향을 주는 요소가 있을 것이라고 예상할 수 있다. 필라멘트 사이에 존재하는 공극의 연속성과 시편 내부에 존재하는 공극의 최대 크기가 강도에 영향을 주는 여러 요소들 중 하나라고 볼 수 있다.

축 별 인장강도에 대한 평균값을 확인한 결과, Y축으로 하중을 가한 필라멘트 사이의 인장 강도가 레이어 사이의 인장 성능보다 10% 정도 더 낮게 평가되었다. 연속된 두 필라멘트 사이에 덩어리 형태로 존재하는 큰 공극 또는 재료 비움 현상이 발생함으로 인해,

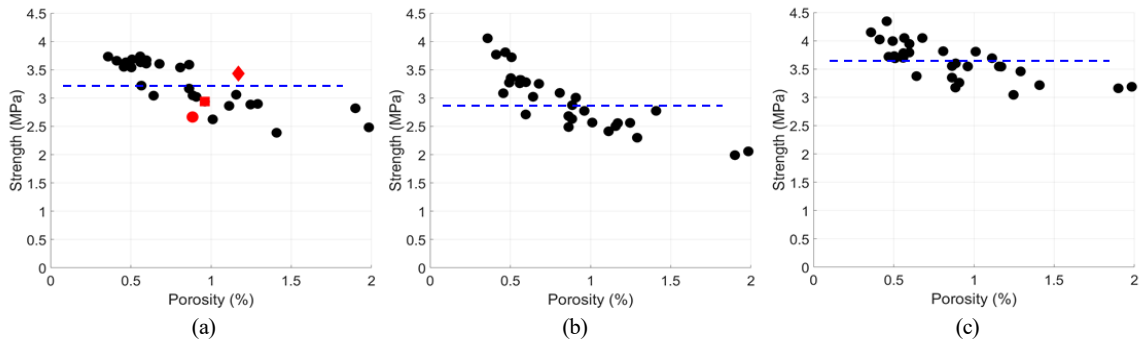


Fig. 4. Relationship between Porosity and Strength: (a) X-direction, (b) Y-direction, (c) Z-direction

3D 프린팅된 구조물에 복합 하중이 가해지는 경우 필라멘트들 사이에서 가장 먼저 파괴가 진행될 수 있음을 예상할 수 있다. 이러한 결과는 동일한 가상 시편을 사용하여 방향만 바꾸어 해석된 결과들의 차이로, 공극의 방향성이 재료 응답에 미치는 영향으로 볼 수 있다. 이에 따라 공극이 분포하는 특성을 정성적 또는 정량적으로 평가할 수 있는 기법이 필요함을 알 수 있다. 이에 대해 다음 절에서 논의하였다.

4. 고찰

공극의 양을 나타내는 공극비로만으로는 방향성을 갖는 공극들이 재료 응답 또는 기계적 물성에 주는 영향을 파악하는데 한계가 있다. 이에 따라 공극 분포 특성의 방향성을 평가할 수 있는 확률론적 기법을 적용하여, 적층 구조물에 발생할 수 있는 비균질적인 공극 분포 특성을 정성적으로 확인하였다. 본 연구에서는 저차원 확률 함수를 활용하여 특정 상 내부에 있는 두 점이 특정 방향으로 연속되어 있을 확률을 확인하였으며, 연속된 정도(두 점 사이의 거리)에 따른 상 분포 확률을 계산하였다. 특히, 공극에 대한 연속성을 가상 시편의 방향별로 확인하여, 서로 다른 평균 인장강도 결과를 설명하고자 하였다.

가상 시편 내부의 공간적 분포를 파악하기 위해서 사용한 저차원 확률분포함수는 통해 적은 양의 데이터로 공간상의 분포를 표현할 수 있는 장점을 갖는다(Kim et al., 2019). 저차원 확률 함수 중 공극에 대한 Linear path function을 확인하였다. 공극이 연속해서 존재할 확률은 Eq. (1)와 같이 나타낼 수 있으며, r 은 두 점을 잇는 선분의 길이, ϕ 는 시편 내부의 공극비와 같다(Han et al., 2018).

$$\lim_{r \rightarrow 0} L_p = \phi \quad \text{and} \quad \lim_{r \rightarrow \infty} L_p = 0 \tag{1}$$

여기서, L_p 는 시편 내부에 두 점을 잇는 선분이 공극 안에 존재할 확률을 나타낸 함수로 정의하였다. 두 점을 잇는 선분 길이 r 이 0에 수렴하면 L_p 는 시편 내부의 공극비와 같고, r 이 무한대로 발산하면 L_p 는 0에 수렴한다. 해당 함수를 사용하여 3D 프린팅 콘크리트 내부에 존재하는 공극의 공간적 분포를 살펴보았다.

방향 별 L_p 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이는 같은 상 내부에 존재하는 두 점을 잇는 선분의 길이를 독립변수로 두고, 선분이 공극 안에 존재할 확률을 종속변수로 두어, 공극의 분포가 얼마나 연속적으로 분포되어 있는지 나타낸 값이다. X축 방향의 결과(Fig. 5(a))는 X축, 즉 적층 방향과 평행한 방향으로 연속된 공극의

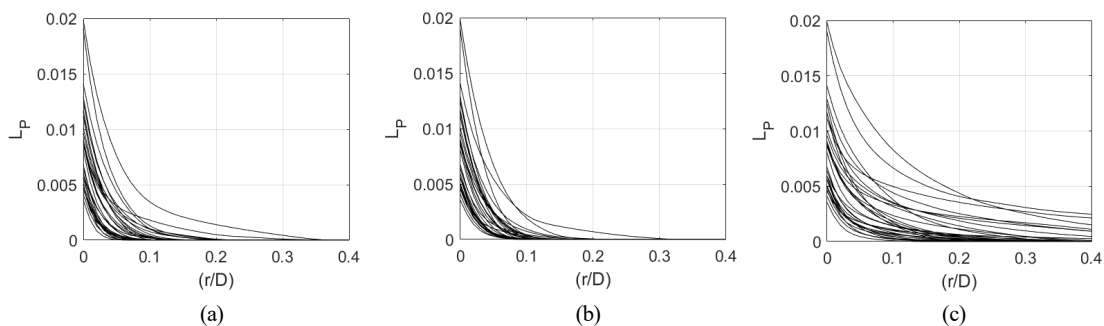


Fig. 5. Probability Distribution Function of Virtual Mesh According to Direction: (a) X-direction, (b) Y-direction, (c) Z-direction

연속성을 의미한다. 반대로 Z축은 출력 방향에 평행한 연속성을 나타낸다(Fig. 5(c)). 두 필라멘트가 부착된 경계면은 XZ 단면(X, Z축 방향 포함)으로 표기할 수 있다. Fig. 5의 결과로부터, X축 및 Y축의 공극 연속성 함수는 정성적으로 유사하지만, Z축 방향(출력 방향)의 L_p 함수는 다른 축들보다 큰 값을 갖는다.

만약 두 필라멘트 사이가 완전히 부착되지 않은 경우에는 공극으로 분리된 상(또는 재료가 채워지지 않은 영역)이 면 또는 판 형태(XZ 방향)로 생성이 될 것이다. 가상 시편의 공극 분포를 확인 결과, 필라멘트 사이의 공극은 한 방향으로의 연속성(Z 방향, 출력 방향)이 우세한 것을 확인할 수 있고, 이는 레이어가 적층되면서 필라멘트 양 끝에서 완전히 재료가 채워지지 않아서 발생한 결과로 볼 수 있다. 둥근 형태의 노즐 사용으로 인해 필라멘트 중간 부분의 불룩한 부분끼리는 부착되지만 양 끝단의 오목하게 들어간 부분들은 일부 부착이 되지 않아 공극이 연속적으로 발생하고 있음으로 설명할 수 있다. 이를 해결하여 부착 성능을 향상하기 위해서는 노즐의 형태 등을 변형하여 최적의 프린팅 조건을 결정해야 한다.

인장강도의 방향성 역시 공극의 연속성 결과와 비교할 수 있다. Z축 연속성은 Z축을 포함하는 두 평면(XZ, YZ 평면)과 관련이 있다. 이에 수직인 방향으로 인장 하중을 가한 결과와 비교한 결과(Fig. 4), Y축 방향의 평균 강도가 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 필라멘트 사이를 나타내는 XZ 평면으로 연속한 공극이 레이어 사이의 공극보다 더 많이 존재하기 때문이다. 이러한 공극의 연속성과 3D 프린팅 구조물 내부의 부착 성능의 상관관계를 보다 정밀하게 분석하기 위해서는 정성적인 분석 방법 외에 정량적으로 분석할 수 있는 기법을 활용할 수 있다. 이는 추후 연구로 진행할 예정이다.

5. 결론

3D 콘크리트 프린팅 시편은 적층면 및 필라멘트 사이의 부착 성능에 의해 적층 구조물의 건전성이 달라질 수 있다. 이에 따라 출력된 시편으로부터 내부 공극 분포 특성을 분석하여 강도와와의 상관관계를 비교하였다. 본 논문의 결론은 아래와 같다:

- (1) 3D 프린팅 시편은 공극 분포 특성이 인장파괴 강도에 영향을 주었다. 공극 분포에 대한 정량적 특성인 공극비와 함께 공극의 최대 크기에도 영향을 받아 프린팅 시편이 적층되는 과정에서 적층 높이 별 공극 분포가 달라질 수 있음을 확인하였다.
- (2) 미세구조의 확률론적 분석을 수행하여 공극의 연속성을 정성적으로 분석하였다. 프린터의 출력 방향에 평행한 방향으로 공극이 연속적으로 존재함을 확인하였고, 프린터에 사용된 노즐 형태를 변경하여 공극의 이방성을 제어하면

향상된 건전성을 기대할 수 있다.


- (3) 마이크로 CT 이미지 및 시뮬레이션 기반의 공극분포에 따른 균열 방향 예측 기법을 제시하였으며, 이를 통해 다양한 프린팅 조건(노즐 형태, 출력 속도, 사이클 타임 등)에 따른 3D 콘크리트 프린팅 구조물의 성능 및 내구성 평가에 활용하고자 한다.

Acknowledgements

This study was supported by the National Research Foundation of Korea, South Korea (NRF-2021R1A4A3030924).

This paper has been written by modifying and supplementing the KSCE 2023 CONVENTION paper.

ORCID

Chan Ho Yoo  <https://orcid.org/0009-0009-2869-7640>

Ji-Su Kim  <https://orcid.org/0009-0003-7265-9381>

References

- Cuevas, K., Weinhold, J., Stephan, D. and Kim, J.-S. (2023). "Effect of printing patterns on pore-related microstructural characteristics and properties of materials for 3D concrete printing using in situ and ex situ imaging techniques." *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 405, 133220, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133220>.
- De Soto, B. G., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G. and Adey, B. T. (2018). "Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall." *Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 92, pp. 297-311, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>.
- Han, T.-S., Zhang, X., Kim, J.-S., Chung, S.-Y., Lim, J.-H. and Christian, L. (2018). "Area of lineal-path function for describing the pore microstructures of cement paste and their relations to the mechanical properties simulated from μ -CT microstructures." *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Vol. 89, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.008>.
- Hong, S., Park, J. and Kim, N. (2018). "Structural stability in concrete 3D printing construction." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, Vol. 30, No. 4, pp. 345-352, <https://doi.org/10.4334/JKCI.2018.30.4.345> (in Korean).
- Kim, J.-S., Chung, S.-Y., Stephan, D. and Han, T.-S. (2019). "Issues on characterization of cement paste microstructures from μ -CT and virtual experiment framework for evaluating mechanical properties." *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 202, pp. 82-102, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.030>.
- Kim, J.-H., Lee, Y. J., Jeong, H. and Kim, K. S. (2021). "Shear bond

- strength of 3D printed concrete layers according to water cement ratio and printing time gap.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 25, No. 6, pp. 199-208, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2021.25.6.199> (in Korean).
- Kruger, J. and van der Westhuizen, J. P. (2023). “Investigating the poisson ratio of 3D printed concrete.” *Applied Sciences*, MDPI, Vol. 13, No. 5, 3225, <https://doi.org/10.3390/app13053225>.
- Lee, H., Kim, J. H. J., Moon, J. H., Kim, W. W. and Seo, E. A. (2019a). “Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography.” *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 226, pp. 712-720, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.161>.
- Lee, Y. J., Song, J.-S., Choi, S.-H. and Kim, K. S. (2019b). “Buildability for concrete 3D printing according to printing time gap.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KISMI, Vol. 23, No. 4, pp. 131-136, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.4.131> (in Korean).
- Ma, G., Li, Z., Wang, L. and Bai, L. (2019). “Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing.” *Materials Letters*, Elsevier, Vol. 235, pp. 144-147, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.159>.
- Miehe, C., Schänzel, L.-M. and Ulmer, H. (2015). “Phase field modeling of fracture in multiphysics problems. Part I: balance of crack surface and failure criteria for brittle crack propagation in thermo-elastic solids.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, Vol. 294, pp. 449-485, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.11.016>.
- Murcia, D. H., Genedy, M. and Taha, M. M. R. (2020). “Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete.” *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 262, 120559, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559>.
- Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Wang, L., Ding, T., Duan, Z. and Du, S. (2021). “Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities.” *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Vol. 122, 104115, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115>.